DOI:10.11931/guihaia.gxzw202405005

13 种溲疏属植物的花粉形态与分类研究

顾亚男，胡晓雨，李爱民，杨玉洁，蒋凭宏，文书生*
（南京林业大学 风景园林学院，南京 210037）

摘　要：为深入研究溲疏属植物花粉形态的分类学意义，厘清溲疏属种间和品种间的亲缘关系，该研究利用扫描电镜观察 6 种 1 变种和 6 品种（以下简称 13 种）溲疏属植物的花粉形态特征（包括花粉大小形状、外壁纹饰及萌发沟），并对花粉定量特征进行主成分分析和聚类分析。结果表明：（1）溲疏属植物花粉保守性较高，所测 13 种溲疏属植物花粉均为单粒长球形或超长球形，中型和小型花粉分别占比 23.08%和 76.92%，极面观为三沟圆形，赤道面观为长椭圆形或椭圆形，外壁纹饰为粗疏网状纹饰。种间和品种间花粉大小、极轴长、赤道轴长、萌发沟长、网眼特征差异显著，小花溲疏是唯一网眼呈不规则形、具棱形突起的溲疏种。6 个品种花粉出现不同程度皱缩、畸形状态，推测与花粉发育不全或败育有关。（2）提取花粉大小、网脊宽度和萌发沟宽 3 个主成分因子，当欧氏平均距离阈值为 15 时，13 种溲疏属植物被划分为 4 个类型，6 种 1 变种中异色溲疏、宁波溲疏、小花溲疏和大花溲疏亲缘关系较近，旱生溲疏与其原变种大萼溲疏亲缘关系较近，粗齿溲疏与上述 6 种亲缘关系较远，6 个品种中‘日光’、‘陀飞轮宝石’和‘草莓田’亲缘关系较近，‘雪绒花’、‘雪樱花’和‘钟花’亲缘关系较近，聚类分析结果支持中间溲疏组与溲疏组分开的观点。（3）推测溲疏属为绣球花科下较晚分化类群。该研究中除宁波溲疏和异色溲疏外，其余 4 种 1 变种和 6 品种花粉形态特征均为首次报道，该研究结果表明花粉形态特征可为溲疏属分类及亲缘关系分析提供重要佐证。

关键词：溲疏属，花粉形态，聚类分析，亲缘关系
中图分类号：Q944.42　　　　　　　　**文献标识码：**A

Pollen morphological and taxonomic study on 13 *Deutzia* plants

GU Yanan, HU Xiaoyu, LI Aimin, YANG Yujie, JIANG Pinghong, WEN Shusheng*
(*College of Landscape Architecture*, *Nanjing Forestry University,* Nanjing 210037, China)

Abstract: This study aimed to investigate taxonomic significance of pollen morphology and clarify phylogenetic relationship of *Deutzia.* The pollen grains including pollen shape and size, exine ornamentation and aperature of 6 species, 1 variety and 6 cultivars in *Deutzia* (following abbreviated as 13 *Deutzia* plants) were observed by scanning electron microscope (SEM). All quantitative characteristics were clustered and analyzed based on the results of palynological clustering. The results were as follows: (1) The pollen of 13 *Deutzia* plants was highly conserved. The observed pollen was prolate or perprolate, with small and medium-sized pollen accounting for 23.08% and 76.92%, respectively. The polar view of the pollen was 3-colpate, and equatorial view was oblong or oval. The pollen exine ornamentation of 13 *Deutzia* plants was all rough reticulate type. The pollen size such as polar and equatorial axis length, ditch length and lumina characteristics varied significantly among species and cultivars. *D. parviflora* was the only species with irregularly lumina and protuberant mesh. A large number of wrinkles and irregular deformities were observed in 6 cultivars, which could be due to incomplete development of pollen. (2) Three principal component factors were selected by PCA analysis, including pollen size, mesh ridge width and ditch width. When the Euclidean mean distance was 15, 13 *Deutzia* plants could be divided into 4 types. Among 6 species and 1 variety, *D. discolor*, *D. ningpoensis*, *D. parviflora* and *D. grandiflora* were closely related; *D. calycosa* var. *calycosa* and *D. calycosa* var. *xerophyta* were closely related. In contrast, *D. crassidentata* was distantly related to the first 6 species. Among 6 cultivars, *D. gracilis* ‘Nikko’, *Deutzia* × *magnifica* ‘Toubillon’ and *Deutzia* × *hybrida* ‘Strawberry Fields’ were related. *Deutzia* × *rosea* ‘Yuki Snowflake’, *Deutzia* × *rosea* ‘Cherry Blossom’ and *Deutzia* × *rosea* ‘Campanulata’ were closely related. Cluster analysis results support the view that sect. *Mesodeutzia* and sect. *Deutzia* should be separated. (3) *Deutzia* was presumed to be a relatively late-diverging group in Hydrangeaceae.

基金项目：江苏省自然科学基金青年项目（BK20180771）；江苏高校优势学科建设工程项目（PAPD）；南京林业大学大学生创新训练计划项（2023NFUSPITP0426）。
第一作者：顾亚男（1995—），硕士研究生，主要从事园林植物遗传育种研究，（E-mail）1195524674@qq.com。
***通信作者：**文书生，博士，副教授，硕士生导师，主要从事园林繁殖栽培与生物技术研究，（E-mail）shusheng0507@126.com。

This is the first report of pollen characteristics of 4 species, 1 variety and 6 cultivars except for *D. ningpoensis* and *D. discolor*, and the results of this study provide important criteria to the classification and phylogenetic relationship analysis of *Deutzia*.
Key words: *Deutzia*, pollen morphology, cluster analysis, phylogenetic relationship

溲疏属（*Deutzia*）由瑞士植物学家 C. P. Thunberg 于 1781 年创立，为绣球花科（Hydrangeaceae）山梅花族（Trib. Philadelpheae）落叶灌木，世界范围内共 60 余种，广泛分布于温带东亚、墨西哥和中美洲地区（Styer & Stern, 1979；黄淑美，1993）。溲疏属起源于中新世早期或晚期的东北亚，中国是溲疏属植物分布中心之一，国内共有 53 种 1 亚种 19 变种（Kim et al., 2015；范琴，2020），横断山脉至秦岭南部和华中地区为我国溲疏现代分布和分化中心，其中四川、云南、湖北、甘肃等为主要分布省份（何平，1990；傅书遐，2002；中国科学院昆明植物研究所等，2006；王了德，2019）。溲疏别名“夏樱花”，其花色素净，花开繁密，抗旱耐瘠薄，适应性强，是兼具观赏、食用、药用与经济价值的园林绿化美化植物，具有广阔的市场应用前景和极高的种质资源利用价值（中国科学院中国植物志编辑委员会，1995）。

目前，溲疏属植物分类和系统演化的研究基础仍较薄弱。前人依据形态性状（Styer & Stern, 1979；Chung & Hyunchur, 1988；黄淑美，1993；李晓珂等，1998；杜洁等，1999；田丽华等，1999；何平等，2000；Carlquist & Schneider, 2004）、分子标记（邓洪平等，1997；Son et al., 2013；吕俊杰等，2015）、染色体核型（Hembree et al., 2020；文书生等，2022）、基因组大小测定（Hembree et al., 2020）和 DNA 序列分析（Hufford et al., 2001；Kim et al., 2015；范琴，2020；张梅等，2021）等开展了初步的系统发育研究，例如黄淑美（1993）依据花瓣长度及花蕾排列方式将中国溲疏属植物分为中间溲疏组（Sect. *Mesodeutzia*）和溲疏组（Sect. *Deutzia*），中间溲疏组下无亚组，溲疏组下包括聚伞花序溲疏亚组（Subsect. *Cymosae*）、溲疏亚组（Subsect. *Deutzia*）、大花溲疏亚组（Subsect *Grandiflorae*）和狭萼溲疏亚组（Subsect. *Stenosepalae*）4 个亚组；杜洁等（1999）结合种子、花部、叶等性状归纳出中间溲疏组和溲疏组下溲疏亚组较原始，溲疏组下除溲疏亚组较进化的结论，成为当前溲疏属植物组间分类的重要依据；但 Kim 等（2015）和范琴（2020）基于叶绿体基因组序列及全基因组分析指出应将中间溲疏组和溲疏组合并。因此，由于该属植物存在复杂的性状重叠，系统发育、组间分类的系统位置仍未完全明确，难以区分高度变异的种间甚至种内植物，极大限制了溲疏属的开发应用。

花粉作为植物个体繁衍和种群演化的重要器官，其形态特征如大小、形状、外壁纹饰、萌发孔类型等具有较高的遗传保守性，可以为被子植物分类及系统演化提供重要参考，例如学者通过观察报春花属（*Primula*）10 个种（刘林等，2022）、睡莲属（*Nymphaea*）18 个种（品种）（曹婧等，2023）、凤仙花属（*Impatiens*）20 种植物（张茜等，2023）等的花粉形态，揭示出植物种间或品种间的亲缘关系。目前，国内外学者针对溲疏属植物花粉的研究仅有零星报道。何平等（1990）和倪穗等（1998）分别对四川省 13 种 3 变种和浙江省 4 种溲疏属植物花粉开展形态学研究，指出溲疏属植物花粉形态较为保守，花粉为长球形或近球形，具 3 孔沟，外壁纹饰为网状纹饰，并提出花粉外壁网纹在种间差异明显，对开展溲疏属下种的鉴定和种间区分具有重要价值。然而，上述研究存在以下问题：多为早年间开展，受到技术限制，图版较为模糊；仅涉及粉背叶溲疏（*Deutzia hypoglauca*）、多辐溲疏（*D. multiradiata*）、宁波溲疏（*D. ningpoensis*）等 16 种 3 变种，研究样本较少且多集中在种的水平，大量极具观赏价值及类群代表性的野生种如小花溲疏（*D. parviflora*）、大花溲疏（*D. grandiflora*）以及栽培品种的花粉超微观结构研究仍处于空白；涵盖花粉大小、花粉形状、萌发孔类型、外壁纹饰和网孔直径 5 个指标，但缺乏相关性分析。由此可见，现有溲疏属植物种间的花粉超微观结构研究较少且尚未有利用花粉形态特征对溲疏属植物开展品种水平的亲缘关系分析。

鉴于此，本研究以 6 种 1 变种和 6 品种（下文简写为 13 种）溲疏属植物为试验材料，除宁波溲疏和异色溲疏（*D. discolor*）外，其余 4 种 1 变种和 6 品种花粉形态特征均为首次报道，利用扫描电镜进行详细的花粉形态观察并开展主成分分析和聚类分析，拟探讨以下问题：（1）花粉形态特征是否支持传统形态学关于溲疏属下组以及亚组的划分；（2）13 种溲疏属植物花粉形态特征在种间及品种间的分类学意义；（3）绣球花科下主要属的系统发育及演化关系。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试 13 种溲疏属植物经收集、采购等途径后统一种植于南京林业大学园林国家级实验教学示范中心（118°

49′38.01″E、32°05′6.06″N），栽培和养护条件一致（表 1）。13 份种质分布区域差异显著，但在南京地区均成功引种且生长状态良好、夏季景观价值极高，其中 6 个品种为我国近年来引进的溲疏属优良品种资源，市场认可度高（Hatch, 2017）。

表 1　供试溲疏属植物材料基本信息

Table 1　The essential information of *Deutzia* materials

序号 Code	植物材料 Plant material	主要性状 Trait	花期 Flowering time	分组/亲本 Classification/Parents	来源 Provider
1	小花溲疏 *D. parviflora*	株高约 2 m，花瓣白色，宽倒卵形或近圆形 About 2 meters high, broadly obovate or subrounded white petals	5 月、6 月 May and June	中间溲疏组 Sect. *Mesodeutzia*	北京林业大学 Beijing Forestry University
2	大花溲疏 *D. grandiflora*	株高约 2 m，花瓣白色，长圆形或倒卵状披针形 About 2 meters high, oblong or obovoid white petals	4—6 月 April to June	溲疏组大花溲疏亚组 Sect. *Deutzia*, subsect *Grandiflorae*	北京林业大学 Beijing Forestry University
3	异色溲疏 *D. discolor*	株高 2~3 m，花瓣白色，椭圆形 2-3 metres high, elliptic white petals	6 月、7 月 June and July	溲疏组溲疏亚组 Sect. *Deutzia*, subsect. *Deutzia*	虹越花卉股份有限公司 Hongyue Horticultural Corporation
4	宁波溲疏 *D. ningpoensis*	株高 1~2.5 m，花瓣白色，长圆形 1-2.5 meters high, oblong white petals	5—7 月 May to July	溲疏组溲疏亚组 Sect. *Deutzia*, subsect. *Deutzia*	南京中山植物园 Zhongshan Batanical Garden
5	粗齿溲疏 *D. crassidentata*	株高约 2 m，花瓣白色，先端极尖或钝 About 2 meters high, white petals with particularly pointed or blunt	7 月 July	溲疏组狭萼溲疏亚组 Sect. *Deutzia*, subsect. *Stenosepalae*	南京中山植物园 Zhongshan Batanical Garden
6	大萼溲疏 *D. calycosa* var. *calycosa*	株高约 2 m，花瓣紫红，阔椭圆形 About 2 meters high, broadly elliptic violet red petals	3 月、4 月 March and April	溲疏组狭萼溲疏亚组 Sect. *Deutzia,* subsect. *Stenosepalae*	虹越花卉股份有限公司 Hongyue Horticultural Corporation
7	旱生溲疏 *D. calycosa* var. *xerophyta*	株高约 2 m，花瓣粉白，阔椭圆形 About 2 meters high, broadly elliptic, white and pink petals	3 月、4 月 March and April	大萼溲疏变种，溲疏组狭萼溲疏亚组 variety of *D. calycosa*, Sect. *Deutzia,* subsect. *Stenosepalae*	虹越花卉股份有限公司 Hongyue Horticultural Corporation
8	‘日光’ *D. gracilis* ‘Nikko’	株高 30～60 cm，单瓣白花，秋叶红色 About 30-60 centimeters high, single white flower, red autumn leaves	4 月、5 月 April and May	细梗溲疏，亲本属溲疏组溲疏亚组 *D. gracilis*, belong to Sect. *Deutzia*, subsect. *Deutzia*	虹越花卉股份有限公司 Hongyue Horticultural Corporation
9	‘草莓田’ *Deutzia* × *hybrida* ‘Strawberry Fields’	株高 1.2~1.8 m，花瓣星型，白色带粉晕；溲疏粉色花中最好的品种 About 1.2-1.8 meters high, star-shaped white flower with pink edge; the best variety of *Deutzia* pink flowers	5 月、6 月 May and June	长叶溲疏与紫花溲疏杂交品种，父母本均属溲疏组狭萼溲疏亚组 Hybrid of *D. longifolia* and *D. purpurascens*, and its male and female parent belong to Sect. *Deutzia*, subsect. *Stenosepalae*	虹越花卉股份有限公司 Hongyue Horticultural Corporation
10	‘陀飞轮宝石’ *Deutzia*× *magnifica* ‘Toubillon Rouge’	株高 1.2~1.8 m，枝条直立，花朵单瓣星型，粉白 About 1.2-1.8 meters high, upright branches, star-shaped white and pink flower	4—6 月 April to June	溲疏与异色溲疏杂交品种 Hybrid of *D. scabra* and *D. discolor*	虹越花卉股份有限公司 Hongyue Horticultural Corporation
11	‘雪绒花’ *Deutzia* × *rosea* ‘Yuki Snowflake’	株高 0.6~0.8 m，花白色，细密；秋叶酒红色 About 0.6-0.8 meters high, numerous small white flowers; red autumn leaves	4 月、5 月 April and May	‘日光’与‘卡米拉’杂交品种，‘卡米拉’为紫花溲疏与细梗溲疏杂交品种 Hybrid of *D. gracilis* ‘Nikko’ and *Deutzia* × *rosea* ‘Carminea’, and the latter is the hybrid of *D.*	虹越花卉股份有限公司 Hongyue Horticultural Corporation

				purpurascens and *D. gracilis*	
12	‘雪樱花’ *Deutzia* × *rosea* ‘Yuki Cherry Blossom’	株高 0.6~0.8 m，花粉色，细密；秋叶酒红色 About 0.6-0.8 meters high, numerous small pink flowers; red autumn leaves	4 月、5 月 April and May	同上 As above	虹越花卉股份有限公司 Hongyue Horticultural Corporation
13	‘钟花’ *Deutzia* × *rosea* ‘Campanulata’	株高约 1.2 m，小花钟状，纯白色，耐寒 About 1.2 meters high, mitriform and pure white flowers; cold-hardiness	5 月、6 月 May and June	紫花溲疏与细梗溲疏杂交品种 Hybrid of *D. purpurascens* and *D. gracilis*	虹越花卉股份有限公司 Hongyue Horticultural Corporation

注：编号 1~6 为不同种，7 为 6 的变种，8~13 为不同品种。

Note: Numbers 1~6 are different species, number 7 is the variety of number 6, and number 8~13 are different varieties.

1.2 试验方法

于 2023 年 3—7 月溲疏花期内天气晴朗的上午 9：00—10：00 采集每个样本植物 3 个不同单株的大蕾期花朵，重复 3 次。取新鲜花药置于 10 mL 离心管中迅速送南京林业大学电镜室制样，将花粉均匀撒在有导电胶的样品台上，经离子溅射仪（QUORUM Q150R S，UK）真空喷金镀膜后，置于 QUANTA 200 扫描电镜（电压 15 kV）下观察花粉外观形态及表面纹饰。首先在 500 ×视野下对花粉整体进行拍照，随后在 2 000 ×、5 000 ×视野下对具有代表性的花粉赤道面以及极面进行拍照，最后在 10 000 ×视野下观察表面纹饰类型（外壁纹饰、网眼分布均匀度和形状、网眼内颗粒物附属物密度和网脊边缘形状）。

采用 Auto CAD 2022 软件测量花粉粒极轴长（P）、赤道轴长（E）、萌发沟长、萌发沟宽、网眼直径及网脊宽度，每项指标测量 30 粒花粉，记录最大值和最小值表示变化幅度，结果以“平均值±标准差”表示。计算 P/E 表示花粉形状，P/E≥2.0 为超长球形，1.14≤P/E＜2.0 为长球形（Erdtman, 1978；王伏雄等，1995）；花粉大小依据极轴长长度来划分，极轴长 10～25 μm 为小型花粉，25～50 μm 为中型花粉，50～100 μm 为大型花粉（Erdtman, 1978）；外壁纹饰术语描述参考孢粉学专著（王开发和王宪曾，1983；蓝盛银和徐珍秀，1996）。

1.3 数据分析

采用 Microsoft Office 2019 和 SPSS 26.0 软件进行数据处理和方差分析，8 个花粉形态数据指标（极轴长、赤道轴长、极赤比、花粉大小、萌发沟长、萌发沟宽、网眼直径、网脊宽度）通过 SPSS 软件标准化处理后进行主成分分析（PCA），主成分分析图利用 Origin 2018 进行绘制，并选择不同指标数据进行聚类分析，聚类方法采用组间连接与欧氏距离法。

2 结果与分析

2.1 花粉形态特征

2.1.1 花粉大小和形状

通过扫描电镜观察 13 种溲疏属植物的花粉大小及形状特征（表 3、图 1、图 2）发现，均为单粒花粉，极面观为三沟圆形，赤道面观为长椭圆形或椭圆形，左右对称。6 种及 1 变种的溲疏花粉粒饱满，其余 6 个品种的花粉粒均表现不同程度的皱缩、畸形状态。

6 种及 1 变种的极轴长（P）为 18.98~27.80 μm，赤道轴长（E）为 11.08~14.26 μm，P/E 为 1.70~2.06，花粉大小差异显著。除粗齿溲疏为中型花粉外，其余 6 种均为小型花粉，旱生溲疏花粉最小。从花粉形状来看，除小花溲疏为超长球形外（图 1:1C；表 2），其余均为长球形，旱生溲疏的 P/E 值最小。其中，旱生溲疏极轴长、P/E 值、花粉大小、萌发沟长均显著小于其原变种大萼溲疏，并且原变种相对于其余 5 个种的花粉也显著变小，因此花粉形状、大小、极轴长和萌发沟长 4 个定量指标能作为 7 个野生种的种间分类依据。

6 个品种的极轴长为 18.55~27.46 μm，赤道轴长为 10.05~16.42 μm，P/E 为 1.65~1.94。‘草莓田’和‘陀飞轮宝石’花粉为中型花粉，其余均为小型花粉，‘雪樱花’花粉最小，6 个品种花粉均为长球形。拥有相同亲本的‘雪绒花’和‘雪樱花’花粉大小、形状相似度极高，极轴长和赤道轴长在 6 个品种中较短，与其亲本‘日光’相比花粉大小和萌发沟长均显著变短。‘陀飞轮宝石’除萌发沟宽与其亲本异色溲疏相近外，其余 6 个花粉形状大小的定量指标均显著大于其亲本。

因此，依据花粉粒大小和形状可将 6 种及 1 变种溲疏属植物花粉划分为超长球形小型花粉（小花溲疏）、长球形中型花粉（粗齿溲疏）和长球形小型花粉（大花溲疏、异色溲疏、宁波溲疏、旱生溲疏和大萼溲疏）3 种类型，将 6 个品种的花粉划分为长球形中型花粉（‘草莓田’、‘陀飞轮宝石’）和长球形小型花粉（‘日光’、‘雪绒花’、‘雪樱花’和‘钟花’）2 种类型。

2.1.2 外壁纹饰

13 种溲疏属植物的花粉外壁均为粗疏网状纹饰，但脊宽、网眼形状和大小不一，网眼内附属物密集度存在差异（表 2、表 3、图 1、图 2）。

6 种及 1 变种按照网眼形状可分为不规则形和近圆形这 2 种类型，其中小花溲疏是唯一网眼呈不规则形，具有棱形突起的溲疏种（图 1:1D）。根据网眼附属物密度又可分为 4 种类型，具体为无颗粒物（粗齿溲疏）、低密度颗粒物（宁波溲疏、大萼溲疏和旱生溲疏）、中密度颗粒物（小花溲疏、异色溲疏）和高密度颗粒物（大花溲疏）。此外，不同种间网眼大小、网脊宽度存在显著差异，其中网眼最大的是粗齿溲疏，平均直径为 0.90 μm，网眼最小的是异色溲疏，平均直径为 0.65 μm；网脊宽度最大的是小花溲疏和大萼溲疏，平均脊宽为 0.36 μm，最小的是粗齿溲疏，平均脊宽为 0.30 μm。

6 个品种按网眼形状可分为近圆形和圆形及近圆形 2 种类型，仅有‘草莓田’和‘钟花’为圆形和近圆形网眼。根据网眼大小又可划分为中等网眼和较大网眼 2 种类型，网眼最大的是‘钟花’，平均直径为 0.89 μm，网眼最小的是‘雪樱花’，平均直径为 0.71 μm。网脊最宽的是‘雪绒花’，平均宽度为 0.33 μm，最窄的是‘日光’，平均宽度为 0.24 μm。‘雪樱花’和‘雪绒花’的外壁纹饰呈现出高度相似性，网眼均为近圆形，中等大小，网脊为波状、宽；二者与‘钟花’外壁纹饰有显著差异，‘钟花’网眼形状呈圆形和近圆形，网眼较大，网脊为波状、窄。‘雪樱花’、‘雪绒花’与‘日光’相比，网脊宽度显著变小。‘陀飞轮宝石’相较于异色溲疏网脊宽度显著变窄，表明花粉外壁纹饰可以作为溲疏属种间的分类依据，但只能作为品种间以及品种和亲本间的辅助分类依据。

2.1.3 萌发沟

13 种花粉均为赤道萌发孔，萌发沟为 3 孔沟类型，沟中部较宽而两端窄，沟长达两极，沟中孔不明显（表 2、图 1、图 2）。萌发沟沿极轴方向以等间距环状分布，从极面可以观察到 3 条，从赤道面可以观察到 1~2 条，沟长直达两极，萌发沟结构无明显差异。6 种及 1 变种的萌发沟长为 17.27~22.96 μm，萌发沟宽为 2.29~2.81 μm；萌发沟最长的为粗齿溲疏，最短的为旱生溲疏；萌发沟最宽的为旱生溲疏，最窄的为大花溲疏；旱生溲疏萌发沟长显著短于其原变种。6 个品种萌发沟长为 17.53~24.24 μm，萌发沟宽为 2.34~2.60 μm；萌发沟最长的为‘陀飞轮宝石’，最短的为‘雪樱花’；萌发沟最宽的为‘陀飞轮宝石’，最短的为‘草莓田’。‘雪樱花’和‘雪绒花’萌发沟长显著小于亲本‘日光’，‘陀飞轮宝石’萌发沟长与其亲本异色溲疏存在显著差异，表明萌发沟长可作为品种与其亲本间的分类依据。

表 2　13 种溲疏属植物花粉外壁纹饰

Table 2　Pollen exine ornamentation of 13 *Deutzia* plants

编号 Code	植物材料 Plant material	萌发沟 Aperture	网眼 Lumina	网眼形状 Lumina shape	网眼附属物密度 Appendages density in lumina	网眼大小 Lumina size	网脊 Mesh ridge
1	小花溲疏 *D. parviflora*	3	不均匀 Uneven	不规则形 Irregular	中密度 Medium density	中等 Medium	外突，宽 Protuberant, wide
2	大花溲疏 *D. grandiflora*	3	均匀 Even	近圆形 Subround	高密度 High density	较小 Small	波状，宽 Wavy, wide
3	异色溲疏 *D. discolor*	3	均匀 Even	近圆形 Subround	中密度 Medium density	较小 Small	平滑，宽 Smooth, wide
4	宁波溲疏 *D. ningpoensis*	3	均匀 Even	近圆形 Subround	低密度 Low density	中等 Medium	波状，宽 Wavy, wide
5	粗齿溲疏 *D. crassidentata*	3	均匀 Even	近圆形 Subround	无 None	较大 Big	平滑，窄 Smooth, narrow
6	大萼溲疏 *D. calycosa* var. *calycosa*	3	均匀 Even	近圆形 Subround	低密度 Low density	中等 Medium	波状，宽 Wavy, wide
7	旱生溲疏 *D. calycosa* var. *xerophyta*	3	均匀 Even	近圆形 Subround	低密度 Low density	中等 Medium	平滑，宽 Smooth, wide
8	‘日光’ *D. gracilis* ‘Nikko’	3	不均匀 Uneven	近圆形 Subround	中密度 Medium density	较大 Big	平滑，窄 Smooth, narrow
9	‘草莓田’ *Deutzia* × *hybrida* ‘Strawberry Fields’	3	均匀 Even	圆形，近圆形 Round, subround	无 None	较大 Big	平滑，窄 Smooth, narrow
10	‘陀飞轮宝石 *Deutzia* × *magnifica* ‘Toubillon Rouge’	3	均匀 Even	近圆形 Subround	中密度 Medium density	中等 Medium	平滑，窄 Smooth, narrow
11	‘雪绒花’	3	均匀	近圆形	中密度	中等	波状，宽

	Deutzia × *rosea* ‘Yuki Snowflake’		Even	Subround	Medium density	Medium	Wavy, wide
12	‘雪樱花’ *Deutzia* × *rosea* ‘Yuki Cherry Blossom’	3	均匀 Even	近圆形 Subround	高密度 High density	中等 Medium	波状，宽 Wavy, wide
13	‘钟花’ *Deutzia* × *rosea* ‘Campanulata’	3	均匀 Even	圆形，近圆形 Round, subround	高密度 High density	较大 Big	波状，窄 Wavy, narrow

注：网眼直径≥0.80 μm 为网眼较大，0.70 μm≤网眼直径＜0.80 μm 为网眼中等，网眼直径＜0.70 μm 为网眼较小。

Note: Lumina diameter ≥0.80 μm indicates big lumina, 0.70 μm≤lumina diameter ＜0.80 μm indicates medium lumina, lumina diameter＜0.70 μm indicates small lumina.

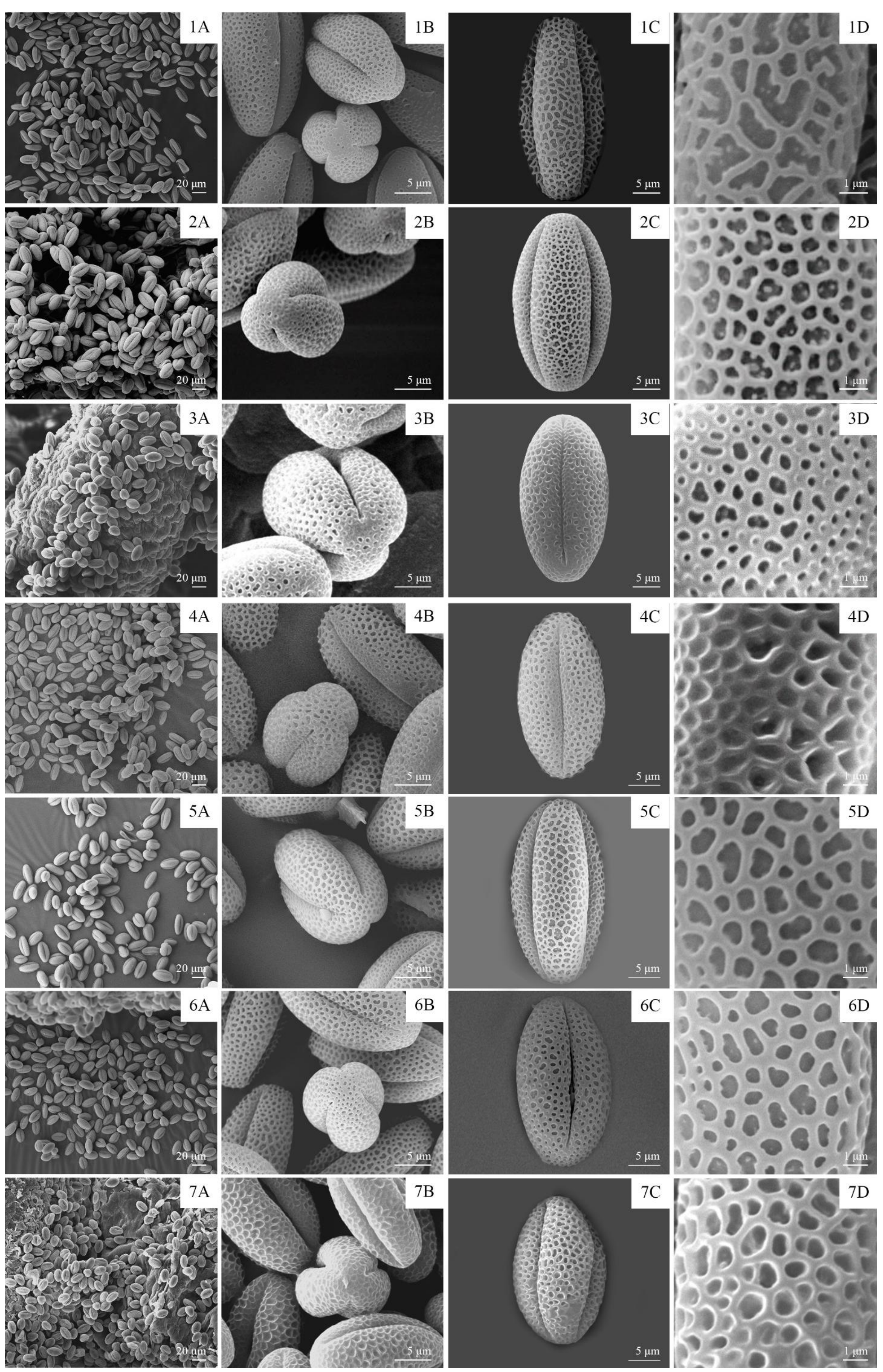
表 3　13 种溲疏属植物的花粉形态特征

Table 3　Pollen morphology of 13 *Deutzia* plants

编号 Code	植物材料 Plant materials	花粉大小 P×E Pollen size (μm × μm)	极轴 P Polar axis length (μm)	赤道轴 E Equatorial axis length (μm)	P/E	花粉形状 Pollen shape	沟长 Ditch length (μm)	沟宽 Ditch width (μm)	网脊宽度 Mesh ridge width (μm)	网眼直径 Lumina diameter (μm)
1	小花溲疏 *D. parviflora*	(22.10~25.30) × (10.70~12.40)	23.80±0.57cd	11.58±0.20de	2.06±0.05a	超长球形 Perprolate	22.93±0.83bc (21.00~25.20)	2.30±0.04bc (2.10~2.50)	0.36±0.02a (0.30~0.50)	0.78±0.05bc (0.46~1.13)
2	大花溲疏 *D. grandiflora*	(22.00~25.80) × (11.70~13.80)	24.31±0.27c	12.52±0.09c	1.94±0.04ab	长球形 Prolate	22.06±0.95c (21.40~24.00)	2.29±0.15c (1.90~2.90)	0.31±0.05abcd (0.10~0.40)	0.67±0.04d (0.51~0.78)
3	异色溲疏 *D. discolor*	(20.50~23.80) × (10.90~13.50)	23.26±0.42d	12.61±0.27c	1.85±0.05b	长球形 Prolate	20.50±0.38d (17.90~23.20)	2.37±0.38abc (1.80~3.70)	0.35±0.03ab (0.20~0.50)	0.65±0.01d (0.46~0.82)
4	宁波溲疏 *D. ningpoensis*	(20.10~25.90) × (11.80~13.70)	22.33±0.42e	11.86±0.19d	1.88±0.06b	长球形 Prolate	19.74±0.24de (17.40~22.40)	2.44±0.15abc (1.90~2.90)	0.35±0.03ab (0.30~3.40)	0.74±0.08bcd (0.55~1.00)
5	粗齿溲疏 *D. crassidentata*	(24.50~30.10) × (13.30~15.50)	27.80±0.92a	14.26±0.29b	1.95±0.07ab	长球形 Prolate	22.96±1.06bc (19.30~26.60)	2.65±0.25abc (1.90~3.90)	0.30±0.03abcd (0.20~0.40)	0.90±0.03a (0.58~1.22)
6	大萼溲疏 *D. calycosa* var. *calycosa*	(20.70~23.70) × (9.90~11.10)	21.83±0.27e	11.08±0.13ef	1.97±0.02ab	长球形 Prolate	19.72±0.66de (16.60~22.00)	2.75±0.26ab (1.90~3.60)	0.36±0.06a (0.20~0.50)	0.73±0.12cd (0.53~1.10)
7	旱生溲疏 *D. calycosa* var. *xerophyta*	(17.70~20.40) × (10.00~12.60)	18.98±0.03g	11.36±0.22de	1.70±0.07c	长球形 Prolate	17.27±0.35f (15.80~18.30)	2.81±0.16a (2.20~3.60)	0.33±0.03abc (0.20~0.50)	0.78±0.03bc (0.55~1.04)
8	‘日光’ *D. gracilis* ‘Nikko’	(19.30~22.80) × (9.10~12.70)	20.66±0.58f	11.06±0.38ef	1.87±0.02b	长球形 Prolate	19.21±0.57e (16.60~21.50)	2.43±0.39abc (1.20~3.90)	0.24±0.03e (0.20~0.40)	0.81±0.05abc (0.56~1.02)
9	‘草莓田’ *Deutzia* × *hybrida* ‘Strawberry Fields’	(24.90~29.30) × (14.40~18.30)	27.46±0.73a	16.42±0.45a	1.67±0.09c	长球形 Prolate	23.39±0.91ab (16.60~26.40)	2.34±0.23bc (1.20~3.70)	0.27±0.03de (0.20~0.40)	0.83±0.05ab (0.53~1.28)
10	‘陀飞轮宝石’ *Deutzia* × *magnifica* ‘Toubillon	(22.30~29.30) × (13.10~17.60)	26.55±0.34b	16.06±0.35a	1.65±0.06c	长球形 Prolate	24.24±0.66a (20.40~30.90)	2.60±0.36abc (1.80~3.40)	0.28±0.02cde (0.20~0.50)	0.75±0.05bcd (0.55~1.09)
11	‘雪绒花’ *Deutzia* × *rosea* ‘Yuki Snowflake’	(17.70~22.10) × (9.20~11.10)	20.17±0.16f	10.39±0.12g	1.94±0.01ab	长球形 Prolate	17.58±0.84f (15.10~20.30)	2.52±0.14abc (1.80~3.30)	0.33±0.04abc (0.20~0.40)	0.72±0.06cd (0.51~0.97)
12	‘雪樱花’ *Deutzia* × *rosea* Cherry Blossom’	(16.20~20.30) × (8.70~11.20)	18.55±0.52g	10.05±0.45g	1.85±0.13b	长球形 Prolate	17.53±0.74f (14.20~19.50)	2.46±0.06abc (1.70~3.30)	0.33±0.02abc (0.30~0.50)	0.71±0.03cd (0.60~0.96)
13	‘钟花’ *Deutzia* × *rosea* ‘Campanulata’	(18.30~21.80) × (9.60~12.20)	19.81±0.39f	10.58±0.40fg	1.88±0.07b	长球形 Prolate	17.69±0.02f (15.30~22.20)	2.49±0.07abc (2.10~3.50)	0.30±0.02bcde (0.20~0.40)	0.89±0.05a (0.69~1.35)

注：同列不同小写字母表示差异显著（P＜0.05）。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences (P<0.05).

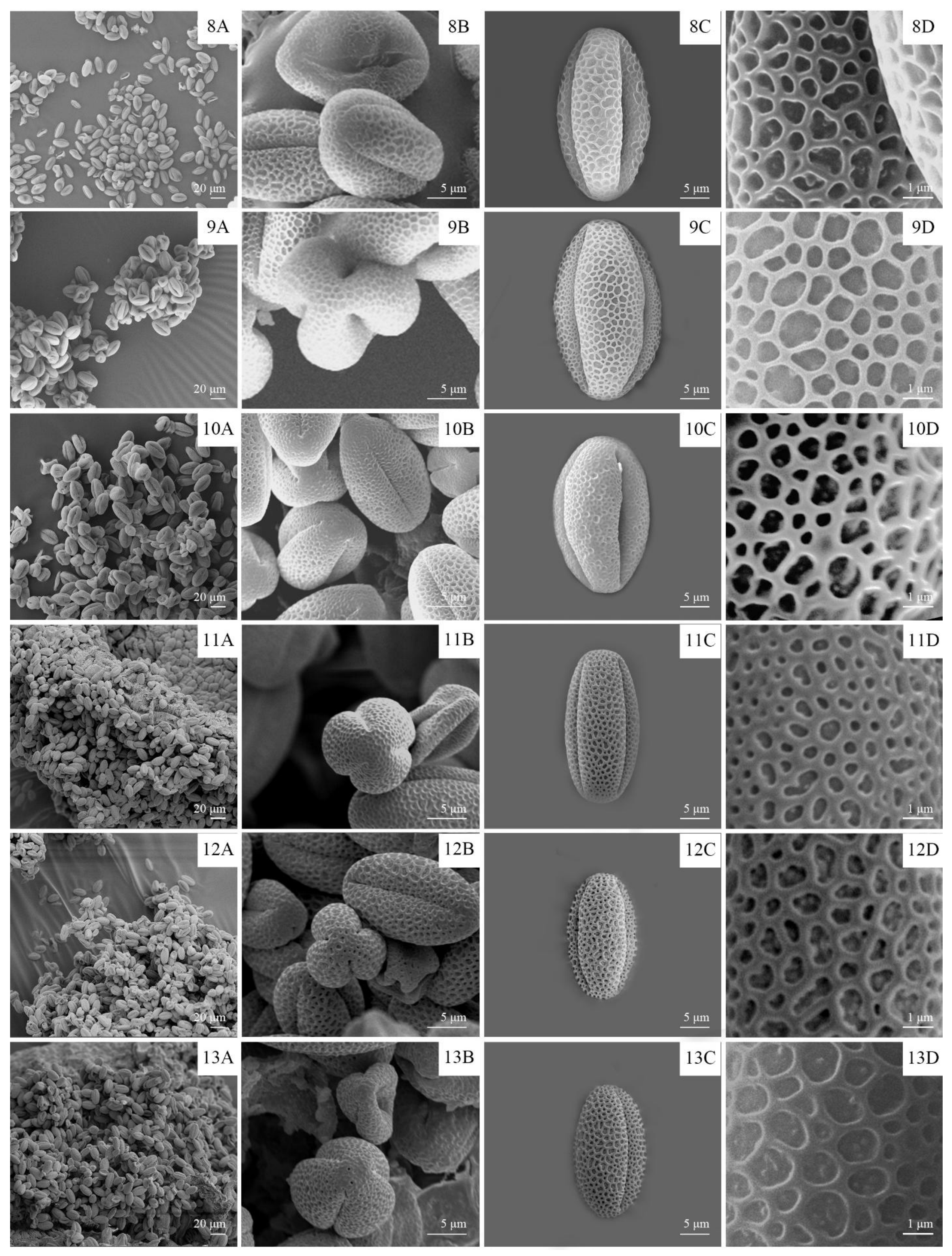

1A
20 µm
1B
5 µm
1C
5 µm
1D
1 µm
2A
20 µm
2B
5 µm
2C
5 µm
2D
1 µm
3A
20 µm
3B
5 µm
3C
5 µm
3D
1 µm
4A
20 µm
4B
5 µm
4C
5 µm
4D
1 µm
5A
20 µm
5B
5 µm
5C
5 µm
5D
1 µm
6A
20 µm
6B
5 µm
6C
5 µm
6D
1 µm
7A
20 µm
7B
5 µm
7C
5 µm
7D
1 µm

1. 小花溲疏；**2**. 大花溲疏；**3**. 异色溲疏；**4**. 宁波溲疏；**5**. 粗齿溲疏；**6**. 大萼溲疏；**7**. 旱生溲疏。**A.** 花粉整体状态；**B.** 花粉极面观；**C.** 花粉赤道面观；**D.** 花粉外壁纹饰。下同。

1. *D. parviflora*; **2**. *D. grandiflora*; **3**. *D. discolor*; **4**. *D. ningpoensis*; **5**. *D. crassidentata*; **6**. *D. calycosa* var. *calycosa*; **7**. *D. calycosa* var. *xerophyte*. **A.** Pollen grain overall state; **B.** Polar view; **C.** Equatorial view; **D.** Exine Ornamentation. The same below.

图 1　溲疏属 6 种及 1 变种植物花粉的扫描电镜观察

Fig. 1　SEM observation on pollen morphology of 6 species and 1 variety in *Deutzia*



8.‘日光’；**9**.‘草莓田’；**10**.‘陀飞轮宝石’；**11**.‘雪绒花’；**12**.‘雪樱花’；**13**.‘钟花’。

8. *D. gracilis* ‘Nikko’; **9**. *Deutzia* × *hybrida* ‘Strawberry Fields’; **10**. *Deutzia* × *magnifica* ‘Toubillon Rouge’; **11**. *Deutzia* × *rosea* ‘Yuki Snowflake’; **12**. *Deutzia* × *rosea* ‘Yuki Cherry Blossom’; **13**. *Deutzia* × *rosea* ‘Campanulata’.

图 2　溲疏属 6 个品种植物花粉的扫描电镜观察

Fig. 2　SEM observation on pollen morphology of 6 *Deutzia* cultivars

2.2 花粉形态的主成分分析和聚类分析

为研究 13 种溲疏属植物花粉主要特征的差异性，对 8 个花粉形态数据指标进行 PCA 主成分分析（表 4、表 5 和图 3）。结果表明，13 种溲疏属植物花粉具有 3 个主成分，贡献率分别是 50.472%、17.275%和 12.965%，累计贡献率为 80.711%（表 4）。根据主成分矩阵（表 5）和 PCA 图（图 3）可知，第 1 主成分主要受花粉大小（P×E）影响，第 2 主成分主要受网脊宽度和 P/E 的影响，第 3 主成分与网眼直径和萌发沟宽相关系数最大，进而推导出花粉大小（P×E）、网脊宽度和萌发沟宽是具有较大影响的性状特征。

表 4　13 种溲疏属植物花粉特征前 3 个主要成分贡献率

Table 4　The first 3 major components of pollen characteristics of 13 *Deutzia* plants

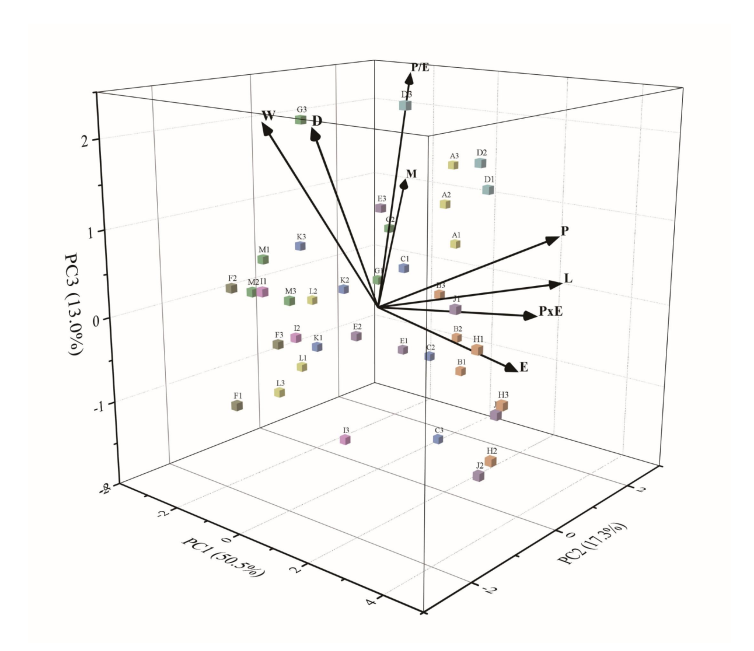
主成分 Principal component	1	2	3
特征值 Eigenvalue	4.038	1.382	1.037
贡献率 Contribution ratio (%)	50.472	17.275	12.965
累计贡献率 Total contributions (%)	50.472	67.746	80.711

表 5　13 种溲疏属植物花粉特征主成分矩阵

Table 5　Component matrix of pollen characteristics of 13 *Deutzia* plants

主成分 Principal component	1	2	3
极轴长（P）Polar axis length	0.929	0.254	0.233
赤道轴长（E）Equatorial axis length	0.975	-0.040	-0.067
P/E	-0.416	0.562	0.575
花粉大小 P×E Pollen size	0.985	0.063	0.060
萌发沟长 Ditch length	0.895	0.326	0.099
萌发沟宽 Ditch width	-0.136	-0.519	0.527
网脊宽度 Mesh ridge width	-0.449	0.561	0.265
网眼直径 Lumina diameter	0.246	-0.553	0.535

以花粉大小、网脊宽度和萌发沟宽为指标，对13种溲疏属植物的花粉特征进行聚类分析并绘制谱系图（图4）。结果表明，在遗传距离为15时，13种溲疏属植物被划分为4个类型。类型 I 花粉较小（18.55 μm×10.05 μm~24.31 μm×12.52 μm），脊宽较宽（0.30~0.36 μm），根据花粉大小及脊宽又分为a、b，2类。a类包括‘雪绒花’、‘雪樱花’和‘钟花’3个品种，是所有亚类中赤道轴最短、花粉最小和萌发沟长最短的一个类群。其中，‘雪绒花’和‘雪樱花’花单瓣先端圆，‘钟花’呈单瓣钟型，‘雪绒花’和‘雪樱花’亲缘关系较近。b类包括小花溲疏、异色溲疏、宁波溲疏和大花溲疏4个种，其中异色溲疏与宁波溲疏亲缘关系较近，二者同属溲疏亚组，小花溲疏与大花溲疏亲缘关系较近。类型 II 花粉中等（18.98 μm×11.36 μm~21.83 μm×11.08 μm），脊宽较宽（0.33~0.36 μm），包括大萼溲疏及其变种旱生溲疏，亲缘关系较近，主要特征是网眼形状均为近圆形，是所有亚类中萌发沟宽最宽的一个类群，但旱生溲疏形态上表现为叶较其原种小，花瓣颜色不同，与原产于东北地区的大花溲疏、小花溲疏和西北-华中地区的宁波溲疏和异色溲疏亲缘关系较远。类型 III 花粉较大（27.80 μm×14.26 μm~27.46 μm×16.42 μm），脊宽较窄（0.27~0.30 μm），网眼较大（0.75~0.90 μm），是所有类群中花粉粒最大、极轴、赤道轴和萌发沟长最长的一个类群，包括粗齿溲疏1个种以及‘陀飞轮宝石’和‘草莓田’2个品种。其中，粗齿溲疏与‘陀飞轮宝石’亲缘关系较近。类型 IV 仅有‘日光’溲疏1个品种，是脊宽最窄的一个品种，‘日光’与‘草莓田’亲缘关系较近，与‘雪绒花’和‘雪樱花’亲缘关系较远。



A1-A3. 小花溲疏；**B1-B3**. 大花溲疏；**C1-C3**. 异色溲疏；**D1-D3**. 粗齿溲疏；**E1-E3**. 宁波溲疏；**F1-F3**. 旱生溲疏；**G1-G3**. 大萼溲疏；**H1-H3**. ‘草莓田’；**I1-I3.** ‘日光’；**J1-J3**. ‘陀飞轮宝石’；**K1-K3**. ‘雪绒花’；**L1-L3**. ‘雪樱花’；**M1-M3**. ‘钟花’。**P**. 极轴；**E**. 赤道轴；**P/E**. 极赤比；**P×E**. 花粉大小；**L**. 萌发沟长；**W**. 萌发沟宽；**M**. 网脊宽度；**D**. 网脊宽度.

A1-A3. *D. parviflora*; **B1-B3**. *D. grandiflora*; **C1-C3**. *D. discolor*; **D1-D3**. *D. crassidentata*; **E1-E3**. *D. ningpoensis*; **F1-F3**. *D. calycosa* var. *xerophyta*; **G1-G3**. *D. calycosa* var. *calycosa*; **H1-H3**. *Deutzia* × *hybrida* ‘Strawberry Fields’; **I1-I3**. *D. gracilis* ‘Nikko’; **J1-J3**. *Deutzia* × *magnifica* ‘Toubillon’; **K1-K3**. *Deutzia* × *rosea* ‘Yuki Snowflake’; **L1-L3**. *Deutzia* × *rosea* ‘Yuki Cherry Blossom’; **M1-M3**. *Deutzia* × *rosea* ‘Campanulata’. **P**. Polar axis length; **E**. Equatorial axis length; **P/E**. Ratio of polar axis to equatorial axis; **P×E**. Pollen size; **L**. Ditch length; **W**. Ditch width; **M**. Mesh ridge width; **D**. Lumina diameter.

图 3　PCA 三维散点图

Fig. 3　PCA three-dimensional scatter plot

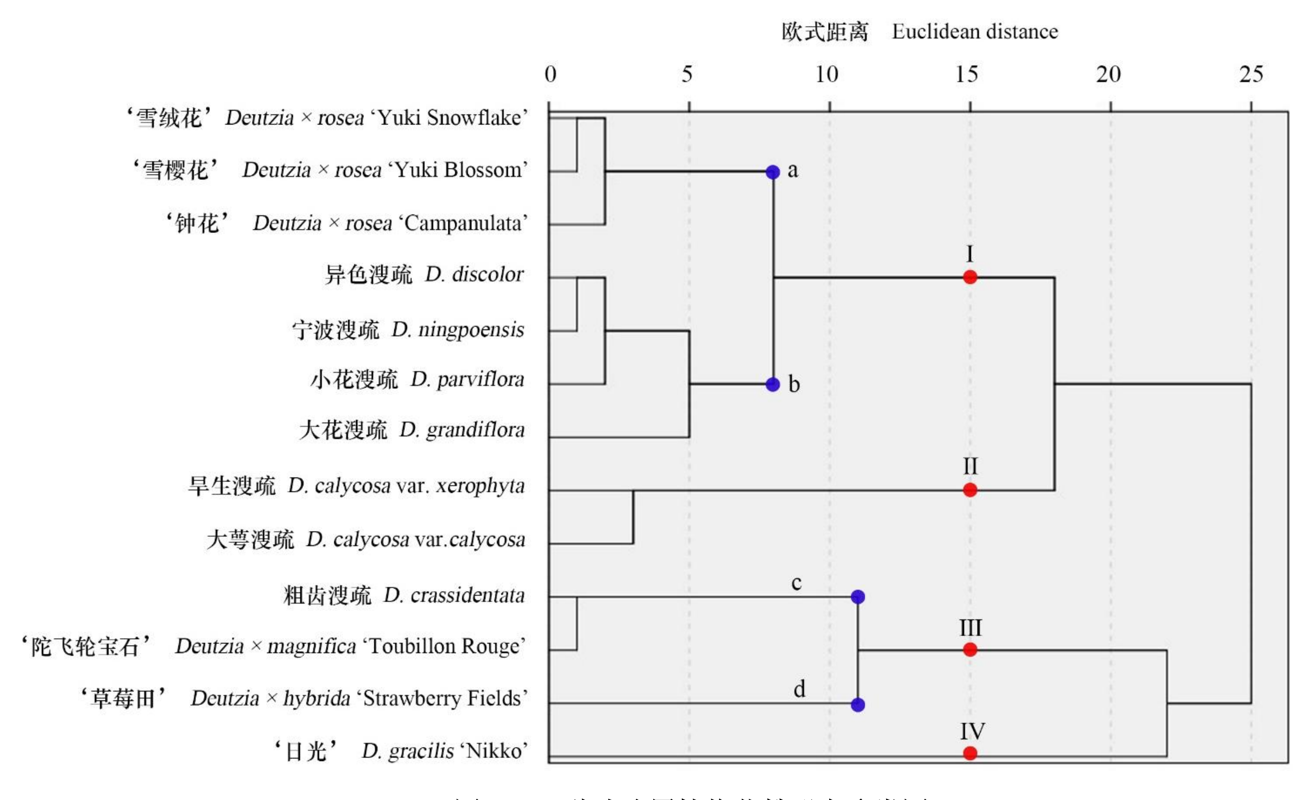


图 4　13 种溲疏属植物花粉形态聚类图

Fig. 4　Cluster analysis of pollen morphology of 13 *Deutzia* plants

3 讨论与结论

3.1 溲疏属植物花粉形态特征

本研究发现 13 种溲疏属植物的花粉均为单粒中小型花粉，极面观为三沟圆形，赤道面观为长椭圆形或椭圆形，花粉萌发沟为 3 孔沟类型，花粉外壁均为网状纹饰，这与前人研究结果基本相符（何平，1990；倪穗等，1998），表明该属的花粉形态保守性较高。本研究中异色溲疏、宁波溲疏花粉外形均为长球形，异于先前二者为近球形的报道（何平，1990；倪穗等，1998），结果不一致可能是花粉处理方式差异造成的，本研究采用基于扫描电子显微镜的新鲜花粉直接镀膜法，花粉形态误差相较于前人采用的醋酸酐分解法更小，P/E 值更接近真实值（方晨，2020）。此外，本研究观察发现 13 个溲疏样本中 7 个野生种的花粉粒均饱满，而 6 个栽培品种的溲疏花粉出现不同程度的干瘪、皱缩、畸形现象，在制备条件一致的条件下推测可能是杂交品种本身花粉发育不全或败育，油茶（*Camellia oleifera*）（Hu et al., 2021）、萱草（*Hemerocallis fulva*）（段连峰等，2023）、大葱（*Allium fistulosum*）（岳丽昕等，2023）等植物花粉同样出现这一现象。

3.2 花粉特征在溲疏属植物分类中的应用

前人研究关于溲疏属下组的划分存在争议，黄淑美（1993）和杜洁等（1999）基于形态特征认为溲疏属下应划分为中间溲疏组和溲疏组，Kim 等（2015）以及范琴（2020）基于 DNA 序列分析提出应将中间溲疏组和溲疏组合并。本研究发现溲疏属植物花粉外壁纹饰组间差异较为明显，中间溲疏组有明显区别于其他亚组的网眼形状和网脊形态，推测不规则网眼以及外突网脊是溲疏属下较早分化的性状；而溲疏组下其他亚组均为圆形或近圆形网眼，是较晚分化的性状。因此，本研究的花粉形态学证据支持黄淑美（1993）和杜洁等（1999）将中间溲疏组与溲疏组分开的结论。此外，本研究聚类分析结果显示，类型 I b 类包括溲疏亚组下宁波溲疏、异色溲疏，中间溲疏组下小花溲疏和大花溲疏亚组下大花溲疏，而这与狭萼溲疏亚组下大萼溲疏、旱生溲疏和粗齿溲疏距离较远。本研究花粉形态聚类图中显示，在遗传距离为 5 时将大花溲疏单独分支，这与 Kim 等（2015）以及范琴（2020）得到的聚类结果相似，证实了大花溲疏亚组单独分为一个亚组的合理性；在遗传距离 1.1 左右小花溲疏、宁波溲疏和异色溲疏聚合在一起，这也与前人基于形态学分析得出的溲疏亚组和中间溲疏组在进化上都是原始的结果一致（黄淑美，1993；中国科学院中国植物志编辑委员会，1995）。综上所述，本研究认为依据花粉形态特征溲疏属下可划分为中间溲疏组和溲疏组 2 个组，溲疏组下包括溲疏亚组、狭萼溲疏亚组、大花溲疏亚组和聚伞花序溲疏亚组，溲疏亚组和中间溲疏组亲缘关系较近，花粉形态特征进一步佐证了传统形态分类学及分子遗传学关于溲疏属下组与亚组的分类地位。

花粉作为植物的保守结构，其形态特征具有可遗传性，同时具有种的特异性（蓝盛银和徐珍秀，1996）。本研究发现溲疏属植物花粉形态在种间差异明显，依据花粉形状和大小能将 6 种 1 变种划分为超长球形小型花粉、长球形中型花粉和长球形小型花粉 3 种类型。同时，本研究聚类分析将旱生溲疏与其近缘种大萼溲疏归入类型 II，但旱生溲疏 P/E 值和花粉大小均显著小于大萼溲疏。因此，本研究认为花粉形状和大小也是区分溲疏属下近缘种间的重要划分依据。此外，大量研究表明植物花粉形态及表面纹饰不仅在种间具有差异，在种下品种分类中也有关键作用，前人利用木槿（赵艺璇等，2021）、玉兰（王啸博等，2023）、番石榴（邵雪花等，2024）等植物品种间的花粉形态差异开展了分类和亲缘关系研究。本研究依据花粉形状和大小将 6 个溲疏属品种划分为 2 种类型，并且发现外壁纹饰对于区分形态特征极其相似的品种具有佐证作用，如类型 I a 类中'雪绒花''雪樱花''钟花'在遗传距离 3 左右聚合，符合三者杂交亲本均为细梗溲疏和紫花溲疏的遗传背景；其中，'雪樱花'和'雪绒花'亲缘关系更近，花粉特征为网眼中等近圆形，网脊波状宽，前人核型研究和 SSR 分子标记也表明二者染色体相似度和遗传相似系数高（文书生等，2022；王书恒，2023）。上述研究表明植物花粉形态特征能够为溲疏属种间尤其是近缘种间、品种间分类及亲缘关系界定提供重要佐证，但植物分类本身具有极高的复杂性，因此后续研究需结合相关形态学、植物化学及系统发育基因组学等数据进行综合考虑。

3.3 基于花粉特征推测溲疏属植物的系统发育

花粉大小及表面纹饰特征在一定程度上可以反映植物的进化程度（王伏雄等，1995），前人研究认为花粉粒大小更易受环境条件影响，植物花粉形态尤其是外壁纹饰相对花粉大小更加稳定（张延龙等，2010）。从花粉萌发孔以及表面纹饰的演化角度来看，花粉萌发孔一般是由 3 沟到 3 孔沟到 3 孔，表面纹饰由较为原始的无结构层演化为孔穴状再到较为进化的网状纹饰（Erdtman, 1978；周守标等，2005；Bednorz et al., 2005）。郝刚和胡启明（1996）通过观测绣球花科 9 个属 31 种植物花粉发现 9 个属植物花粉形状相似，多为近球形至长球形，但在外壁纹饰上存在显著差异，表现为具有粒状或棱形突起，网纹或孔穴状，而由于绣球属花粉形态变异范围涵盖了上述外壁纹饰

特点，提出绣球属在绣球花科演化上处于中心位置。张梅等（2021）针对绣球花科绣球花族 9 个属进行了基因序列分析并构建系统树，认为赤壁木属（*Decumaria*）、冠盖藤属（*Pileostegia*）、钻地风属（*Schizophragma*）、蛛网萼属（*Platycrater*）为较进化类群，叉叶蓝属（*Deinanthe*）、草绣球属（*Cardiandra*）、常山属（*Dichroa*）为基部类群，绣球属为过渡类群。本研究中 13 种溲疏属植物均为 3 孔沟花粉，具粗网状纹饰，因此推测溲疏属相较于绣球属较晚分化。同时，范琴（2020）基于叶绿体全基因组的系统发育和进化分析显示溲疏属和山梅花属分化时间相同。综合上述研究结论和花粉表面纹饰演化进程，本研究认为绣球花科下叉叶蓝属、草绣球属、常山属为较早分化类群，绣球属为过渡类群，赤壁木属、冠盖藤属、钻地风属、蛛网萼属、山梅花属、溲疏属为较晚分化类群，溲疏属为绣球花科下较晚分化类群。

总体而言，溲疏属的花粉形态保守性较高，从花粉进化角度结合前人构建的系统发育树来看，溲疏属为绣球花科下较晚分化类群，花粉形态特征尤其是外壁纹饰可为溲疏属组以及亚组分类地位的确立、种间及品种间亲缘关系界定提供较为可靠的参考，但孢粉学对于品种与亲本间的亲缘关系和系统演化具有一定局限性，7 个杂交品种表现出的花粉皱缩畸形现象的内在机理也有待深入研究。后续研究不仅要进一步拓展花粉形态分析的植物种类，还可以结合 RFLP、RAPD、SSR、AFLP、SNP 等分子标记及基因组测定技术探究溲疏属植物的起源进化、亲缘关系以及遗传多样性等，从而为该属植物的种质资源应用和创新提供理论依据。

参考文献：

BEDNORZ L, MACIEJEWSKA-RUTKOWSKA I, WROŃSKA-PILAREK D, et al., 2005. Pollen morphology of the polish species of the genus *Sorbus* L.[J]. Acta Societatis Botanicorum Poloniae, 74(4): 315-322.

CAO J, DAI ZL, XU YC, et al., 2023. Studies on pollen morphology of *Nymphaea*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 43(7): 1227-1235. [曹婧，戴忠良，徐迎春，等，2023. 睡莲属植物花粉形态研究[J]. 西北植物学报，43(7)：1227-1235.]

CARLQUIST S, SCHNEIDER EL, 2004. Pit membrane remnants in perforation plates of Hydrangeales with comments on pit membrane remnant occurrence, physiological significance and phylogenetic distribution in dicotyledons[J]. Botanical Journal of the Linnean Society, 146(1): 41-51.

CHUNG YH, HYUNCHUR S, 1988. Taxonomic implication of the stellate trichomes to genus *Deutzia Subsection Coreanae* in Korea[J]. Korean Journal of Botany, 30(1): 31-41.

DENG HP, HE P, TAN F, 1997. Numerical analysis of peroxidase isozymic differentiation within and among populations of *Deutzia multiradiata*[J]. Journal of Southwest China Normal University (Nat Sci Ed), 22(2): 67-75. [邓洪平，何平，谈锋，1997. 多辐溲疏居群过氧化物酶同工酶分化的研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版)，22(2)：67-75.]

DU J, LIAO YJ, HE P, et al., 1999. Seed morphology and its taxonomic significance of *Deutzia* Thunb. in China[J]. Journal of Southwest China Normal University (Nat Sci Ed), 24(1): 61-70. [杜洁，廖宇静，何平，等，1999. 中国溲疏属种子形态及其分类学意义[J]. 西南师范大学学报(自然科学版)，24(1)：61-70.]

Duan LF, Li Y, Dong Y, et al. Comparison of fertility and pollen morphology of five double-petaled *Hemerocallis fulva* varieties[J/OL]. Molecular Plant Breeding, http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20231101.1708.006.html, 2023-11-02. [段连峰，李颖，董燕，等. 五个重瓣萱草品种育性与花粉形态比较[J]. 分子植物育种，http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20231101.1708.006.html, 2023-11-02.]

Editorial Board of the Chinese Academy of Sciences Flora of the People's Republic of China, 1995. Flora of China: Volume 35: Division 1[M]. Beijing: Science Press: 70-141. [中国科学院中国植物志编辑委员会，1995. 中国植物志：第 35 卷：第 1 分册[M]. 北京：科学出版社：70-141.]

ERDTMAN G, 1978. Handbook of palynology[M]. Beijing: Science Press: 13-16. [埃尔特曼，1978. 孢粉学手册[M]. 北京：科学出版社：13-16.]

FAN Q, 2020. Chloroplast genome comparison and phylogeny of the Tribe Philadelpheae (Hydrangeaceae)[D]. Guangzhou: South China Agricultural University: 33-43. [范琴，2020. 绣球花科山梅花族代表类群叶绿体基因组结构比较与系统发育研究[D]. 广州：华南农业大学：33-43.]

FANG C, 2020. Variation of pollen morphology under different observing methods[D]. Shanghai: East China Normal University: 13-14. [方晨，2020. 不同观察方式下的花粉形态变化幅度研究[D]. 上海：华东师范大学：13-14.]

FU SX, 2002. Flora Hupehensis[M]. Wuhan: Hubei Science & Technology Press: 98-104. [傅书遐，2002. 湖北植物志[M].

武汉：湖北科学技术出版社：98-104.]
Hatch LC. Cultivars of woody plants: genera D to E [EB/OL]. http: // www. cultivar. org /, 2017-01-18.
HAO G, HU QM, 1996. A study of pollen morphology of Hydrangeoideae (Hydrangeaceae)[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 4(3): 26-31+87-88. [郝刚，胡启明，1996. 绣球亚科花粉形态的研究[J]. 热带亚热带植物学报，4(3)：26-31+87-88.]
HE P, 1990. A preliminary research on pollen morphology of *Deutzia* Thunb. in Sichuan[J]. Journal of Southwest China Normal University (Nat Sci Ed), 15(1): 69-75. [何平，1990. 四川溲疏属花粉形态初步研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版)，15(1)：69-75.]
HE P, YUAN XF, TIAN LH, et al., 2000. Numerical taxonomy of *Mesodeutzia Schneid*. of *Deutzia* Thunb. in China[J]. Journal of Southwest China Normal University (Nat Sci Ed), 25(4): 429-438. [何平，袁小凤，田丽华，等，2000. 绣球花科中国溲疏属小花溲疏组的数量分类[J]. 西南师范大学学报(自然科学版)，25(4)：429-438.]
HEMBREE WG, RANNEY TG, LYNCH NP, et al., 2020. Identification, genome sizes, and ploidy of *Deutzia*[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 145(2): 88-94.
HUANG SM, 1993. The classification and distribution of genus *Deutzia* in China[J]. Journal of Systematics and Evolution, 31(2): 105-126. [黄淑美，1993. 中国溲疏属的分类与地理分布[J]. 植物分类学报，31(2)：105-126.]
HU Y, GAO C, DENG QN, et al., 2021. Anatomical characteristics of petalized anther abortion in male sterile *Camellia oleifera* plants[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 146(6): 411-423.
HUFFORD L, MOODY ML, SOLTIS DE, 2001. A phylogenetic analysis of Hydrangeaceae based on sequences of the plastid gene *matK* and their combination with *rbcL* and morphological data[J]. International Journal of Plant Sciences, 162(4): 835-846.
Kunming Institute of Botany Chinese Academy of Sciences, CHEN SK, LI DZ, 2006. Flora Yunnanica[M]. Beijing: Science Press: 1-140. [中国科学院昆明植物研究所，陈书坤，李德铢，2006. 云南植物志[M]. 北京：科学出版社：1-140.]
KIM C, DENG T, WEN J, et al., 2015. Systematics, biogeography, and character evolution of *Deutzia* (Hydrangeaceae) inferred from nuclear and chloroplast DNA sequences[J]. Molecular Phylogenetics and Evolution, 87: 91-104.
LAN SY, XU ZX, 1996. The SEM of pollen release illustrations[M]. Beijing: Science Press: 42-45. [蓝盛银，徐珍秀，1996.植物花粉剥离观察扫描电镜图解[M]. 北京：科学出版社：42-45.]
LI XK, LIAO YJ, HE P, 1998. Taxonomic studies on Sect. *Mesodeutzia* of the genus *Deutzia* Thunb. (Hydrangeaceae) in China[J]. Journal of Southwest China Normal University (Nat Sci Ed), 23(4): 3-5. [李晓珂，廖宇静，何平，1998. 中国绣球花科溲疏属小花溲疏组的分类研究(Ⅰ)——研究历史、地理分布、组的特征[J]. 西南师范大学学报(自然科学版)，23(4)：3-5.]
LIU L, ZHANG LY, CHENG GL, et al., 2022. Pollen morphology and its taxonomic significance of 10 *Primula* species from the Shergyla Mountains[J]. Guihaia, 42(10): 1675-1683. [刘林，张良英，程贵兰，等，2022. 色季拉山 10 种报春花属植物花粉形态及其分类学意义[J]. 广西植物，42(10)：1675-1683.]
LÜ JJ, MA Y, REN Y, et al., 2015. Genetic diversity analysis of *Deutzia* glabrata in Shandong Province based on SRAP markers[J]. Journal of Forestry Engineering, 29(2): 13-16. [吕俊杰，马燕，任莹，等，2015. 山东崂山溲疏的 SRAP 遗传多样性分析[J]. 林业科技开发，29(2)：13-16.]
NI S, MAO XY, ZHOU HX, 1998. Research on pollen morphology of 4 species in the genus *Deutzia* Thunb. in Zhejiang[J]. Bulletin of Science and Technology, 14(2): 49-52. [倪穗，毛雪莹，周宏星，1998. 浙江溲疏属四个种的花粉形态研究[J]. 科技通报，14(2)：49-52.]
SHAO XH, JIANG HR, CHEN J, et al., 2024. Pollen morphology characteristics of 27 *Psidium guajava* germplasms[J]. Journal of Northwest A & F University (Nat Sci Ed), 52(11): 195-200. [邵雪花，蒋浩然，陈军，等，2024. 27 个番石榴种质花粉形态特征研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，52(11)：1-11.]
SON S, PARK KT, PARK SJ, 2013. Genetic diversity and structure of the Korean rare and endemic species, *Deutzia pdaniculata* Nakai, as revealed by ISSR markers[J]. Korean Journal of Plant Resources, 26(5): 619-627.
STYER CH, STERN WL, 1979. Comparative anatomy and systematics of woody Saxifragaceae *Deutzia*[J]. Botanical Journal of the Linnean Society, 79(4): 291-319.

TIAN LH, HE P, DU J, 1999. The micromorphology of foliar indument of the genus *Deutzia* in China and its taxonomic implication[J]. Journal of Southwest China Normal University (Nat Sci Ed), 24(3): 45-59. [田丽华，何平，杜洁，1999. 中国溲疏属叶表附属物的显微形态及其分类意义[J]. 西南师范大学学报(自然科学版)，24(3)：45-59.]

WANG FX, QIAN NF, ZHANG YL, et al., 1995. Pollen flora of China[M]. Beijing: Science Press: 1-35. [王伏雄，钱南芬，张玉龙，等，1995. 中国植物花粉形态[M]. 北京：科学出版社：1-35.]

WANG LD, 2019. Evaluation and utilization of wild ornamental plant resources of *Deutzia* in Gansu Province[J]. Technical Research, (5): 86-87. [王了德，2019. 甘肃省溲疏属野生观赏植物资源评价与利用[J]. 林业科技通讯，(5)：86-87.]

WANG KF, WANG XZ, 1983. An introduction to palynology[M]. Beijing: Peking University Press: 59-71. [王开发，王宪曾，1983. 孢粉学概论[M]. 北京：北京大学出版社：59-71.]

WANG SH, 2023. Development of EST-SSR markers of *Deutzia* and construction of DNA fingerprint based on RNA-Seq sequencing[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University: 40-46. [王书恒，2023. 基于 RNA-Seq 测序的溲疏 EST-SSR 分子标记开发与 DNA 指纹图谱的构建[D]. 南京：南京林业大学：40-46.]

WANG XB, CAO Y, GUO W, et al., 2023. Morphological characteristics of pollen from 44 species of Subgen. *Yulania*[J]. Acta Horticulturae Sinica, 50(11): 2417-2434. [王啸博，曹颖，郭伟，等，2023. 玉兰亚属 44 种（品种）的花粉形态特征研究[J]. 园艺学报，50(11)：2417-2434.]

WEN SS, MIAO DP, ZHU G, et al. Karyotype analysis of five *Deutzia* species[J/OL]. Molecular Plant Breeding. https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220126.1104.020.html, 2022-01-27. [文书生，苗大鹏，朱葛，等. 5 种溲疏属植物的核型分析[J/OL]. 分子植物育种. https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220126.1104.020.html, 2022-01-27.]

YUE LX, WANG QH, LIU ZZ, et al., 2023. Morphological characteristics of Welsh Onion (*Allium fistulosum* L.) male sterile anther abortion and studies on cytology[J]. China Vegetables, (9): 58-68.[岳丽昕，王清华，刘泽洲，等，2023. 大葱雄性不育花药败育的形态学特征和细胞学研究[J]. 中国蔬菜，(9)：58-68.]

ZHANG Q, ZHAO QY, GU ZJ, et al., 2023. Studies on pollen micromorphology of *Impatiens* plants in southwest Sichuan[J]. Acta Horticulturae Sinica, 50(8): 1664-1678. [张茜，赵秋燕，谷志佳，等，2023. 四川西南地区凤仙花属植物花粉微形态研究[J]. 园艺学报，50(8)：1664-1678.]

ZHAO YX, FENG Q, TIAN L, et al., 2021. Pollen morphology and numerical taxonomy of 22 *Hibiscus syriacus*[J]. Guihaia, 41(1): 103-113. [赵艺璇，冯琪，田琳，等，2021. 22 个木槿品种花粉形态与分类研究[J]. 广西植物，41(1)：103-113.]

ZHANG YL, ZHANG QX, XIE SL, 2010. Pollen morphology of 8 species in *Lilium* from Qinba mountain areas[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 19(1): 144-146. [张延龙，张启翔，谢松林，2010. 秦巴山及其毗邻地区 8 种野生百合孢粉学研究[J]. 西北农业学报，19(1)：144-146.]

ZHANG M, YANG JW, LONG CC, et al., 2021. Molecular systematics and phylogenetic analysis of the *Hydrangea* (Hydrangeaceae)[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 41(2): 242-253. [张梅，杨加文，龙成昌，等，2021. 绣球属(*Hydrangea* L.)植物分子系统学及系统发育分析[J]. 西北植物学报，41(2)：242-253.]

ZHOU SB, YU BQ, LUO Q, et al., 2005. Pollen morphology of *Lycoris* Herb. and its taxonomic significance[J]. Acta Horticulturae Sinica, 32(5): 914-917. [周守标，余本祺，罗琦，等，2005. 石蒜属植物花粉形态及分类研究[J]. 园艺学报，32(5)：914-917.]